DOI:10.11931/guihaia.gxzw202405030

中国外来植物的物种组成、区系特征及影响因素分析

张金梦[1]，朱亮亮[1]，印浩楠[1]，王丽[1]，刘玉莉[2*]

（1. 江苏第二师范学院 地理科学学院，南京 211200；2. 湖州师范学院 可持续发展研究院，浙江 湖州 313000）

摘　要：中国是遭受生物入侵危害和威胁最严重的国家之一，掌握全国尺度上外来植物的物种组成、区系特征及其影响因素对减少外来植物的入侵风险和促进防控管理至关重要。该文以《中国外来植物数据集》为基础，统计分析其物种组成、生活型、区系类型等特征，并利用相关性分析和逐步回归模型深入探究了社会经济和生态因素与外来植物之间的关联机理。结果表明：（1）我国已有的外来植物中大型科（99 科，13 741 种）和大型属（205 属，7 199 种）对总物种数的贡献率分别为 93.41%和 48.94%。从生活型组成看，草本植物构成了我国外来植物的主体，占比 59.82%。（2）全国范围内热带成分科占据明显优势，占总科数的 52.65%；其次分别为温带成分科（21.56%）和世界广布科（20.49%）。（3）外来植物总数的分布格局支持了各区系成分科的分布格局，即东部沿海和西南地区的外来植物总数和各区系成分最丰富，向内陆减少。然而，北方省市的世界广布和温带成分科的比重较高，南方省市的热带成分科的占比最高。（4）相关性分析表明入侵植物所在科的入侵种数与该科所包含的外来种数存在显著正相关关系。各省市经济因素和气候条件共同决定了我国外来植物总数和各区系成分科数的空间分布格局，但各区系成分占比主要受热量条件（年均温）的影响。未来我国应大力加强对具有热带性质和世界广布的大科、大属的草本植物的引种评估与监管。

关键词：外来植物，区系成分，物种组成，多样性，分布格局

中图分类号：Q948.5　　　　**文献标识码：**A

Species composition, floristic characteristics and influencing factors of alien plants in China

ZHANG Jinmeng[1], ZHU Liangliang[1], YIN Haonan[1], WANG Li[1], LIU Yuli[2*]

（1. *School of Geographical Sciences, Jiangsu Second Normal University,* Nanjing 211200, China; 2. *Institute of Sustainable Development, Huzhou University,* Huzhou 313000, Zhejiang, China）

Abstract： China is one of the countries most severely affected and imperiled by biological invasions. Mastering the species composition, floristic characteristics, and influencing factors of alien plants on a national scale is paramount to mitigating the risk of alien plant invasion and bolstering preventive measures. Based on a comprehensive dataset of alien plants in China, this paper statistically analyzed the species composition, life form, floristic component and other characteristics. Furthermore, it employed correlation analysis and a stepwise regression model to deeply explore the influence mechanism of alien plants from socio-economic indicators and ecological factors. The results were as follows: (1) The existing alien plants in China belonging to large families (99 families, encompassing 13 741 species) and genera (205 genera, with 7 199 species) significantly contributed 93.41% and 48.94% to the total species number, respectively. Regarding life form composition, herbaceous plants dominated the alien plants in China, comprising 59.82% of the total. (2) Nationally, tropical component families held a significant advantage, accounting for 52.65% of the total families, followed by temperate families (21.56%) and cosmopolitan families (20.49%). (3) The distribution pattern of the total number of alien plants mirrored that of their floristic components, that is, the total number of alien plants and their floristic components were most abundant in the eastern coastal and southwestern regions, gradually decreasing inland in China. Notably, cosmopolitan and temperate families were more

基金项目：江苏省高等学校自然科学研究项目（22KJD170003）；江苏省“双创博士”人才引进项目（JSSCBS20210378）；湖州市自然科学资金项目（2022YZ33）。

第一作者：张金梦 (1988—)，博士，讲师，研究方向为全球变化与植物响应、外来植物入侵等，(E-mail) beike0922@163.com。

*__通信作者：__刘玉莉，博士，助理研究员，研究方向为环境生态、农村可持续发展，(E-mail) liuyuli901@163.com。

prevalent in northern provinces, whereas tropical families dominated southern regions. (4) Correlation analysis underscored a robust linear relationship between the number of invasive alien species and the total alien species within the same family. Socio-economic factors and climate conditions of various provinces and cities jointly determined the spatial distribution pattern of alien plants and floristic component family numbers in China. However, the proportion of each floristic component was mainly influenced by heat conditions (annual average temperature). In the future, China should vigorously strengthen the introduction assessment and supervision of alien plants, particularly the herbaceous plants of large families and genera with tropical characteristics and cosmopolitan distributions.
Key worlds: alien plants, floristic component, species composition, plant diversity, distribution pattern

外来物种(alien species)是指出现在自然分布范围以及潜在扩散范围以外的种、亚种或其他可繁殖的单元，是相对一定区域内本土植物而言的(Chen et al., 2021; 林秦文等, 2022; 刘艳杰等，2022)。当大量外来物种通过有意或无意的人类活动被引入到新的区域，在自然或半自然生态系统中生长繁殖并在经济上、生态上或环境上对引进地造成不利影响时，被称为外来入侵物种(invasive alien species)(Richardson et al., 2000; Pyšek et al., 2020; Chen et al., 2022)。在过去几十年间（1970—2017），世界各国为防控外来物种入侵每年的保守经济成本超数千亿美元，并且呈上升趋势(Diagne et al., 2021)。其中外来植物入侵是当今全球生物入侵中数量和种类最多的，造成直接经济损失达 1 004 亿美元(赵光华等，2024)，对各国的经济、生态、生物多样性及社会环境和人类生活安全造成严重威胁，被认为是 21 世纪最严重的生态威胁之一(Pyšek et al., 2020; 刘艳杰等，2022; Chen et al., 2023; Kripal & Chaeho, 2023)。中国地理位置特殊、地形复杂、气候多样、生物多样性丰富，同时随着中国经济快速发展和全球经济一体化进程的加快，成为遭受外来物种入侵危害和威胁最严重的国家之一。

经济全球化和气候变化正在促进和加剧外来入侵物种的传播(Fonseca et al., 2019; Li & Shen, 2020; Finch et al., 2021)，新的外来物种的引进持续增加，增长趋势因生物类群和地理区域而异(Pyšek et al., 2020)。在中国已确定的 660 多种外来入侵物种中，90%以上都是由人类有意引进或无意带入的(Chen et al., 2022)，自然传播的情况非常少。生境破碎化以及自然生态系统的破坏加剧了外来物种入侵的强度，导致我国未来面临的生物入侵趋势更加严峻(Pyšek et al., 2017; Qin et al., 2023)。外来生物进入新地区后，新地区的气候条件、生境异质性等因素是该物种在新地区能否适应、生存、繁殖、扩散并造成入侵危害的关键(Zhou et al., 2020; Chen et al., 2021; Chen et al., 2022)。研究表明气候（年均温和降水量）因素和社会经济指标结合能更好地解释我国外来入侵植物的分布格局，气候温暖湿润且社会经济比较发达的东部沿海地区和西南地区比西部和北部地区具有更多的入侵物种(Chen et al., 2021, 2023; Chen et al., 2022; 张吉平等, 2023; Yang et al., 2023)。近 80 年来，中国沿海和南方地区的外来物种数量一直在稳步积累，并且还未达到饱和状态(Banerjee et al., 2024)。

植物区系是植物科、属、种的自然综合体，反映了植物的演化及其对地质和气候变化历史的响应特征(Lu et al., 2018; Liu et al., 2023)。外来入侵植物的区系研究是我国学术界关注的重点(刘艳杰等，2022)，我国省域范围内入侵植物区系特征的研究结果较为广泛(侯新星等，2019；谢勇等，2020；宋兴江等，2021；万自学等，2022)，中国南方省市的入侵植物科、属水平上热带成分较高，而北方省市中，温带成分明显增多(殷根深等，2023)。目前，我国外来入侵植物区系特征及其影响因素的研究多集中在较小区域尺度上，并且主要在沿海经济发达地区或西南地区(Chen et al., 2021, 2023)。在全国范围内对外来入侵植物地理分布格局及决定因素的分析较深入(Chen et al., 2021; Chen et al., 2022; 张吉平等，2023)，但对外来入侵植物的区系特征的空间分布格局研究甚少。Wang 等(2016)分析了全国范围内外来入侵种子植物的区系特征，但未对其影响因素进行阐述。

目前，我国专注外来植物的研究还较少，原因在于完整体现外来植物信息的数据库很少(林秦文等，2022)。根据广义外来植物的概念，外来植物包括栽培植物、逃逸植物、归化植物和入侵植物等，其中栽培植物构成了我国外来植物的主体(林秦文等，2022)。我国纬度跨度大，南北差异显著，一些在北方需在温室条件下生存的植物在南方可露天栽培、归化甚至入侵，因而栽培植物仍然具有潜在的入侵风险。但许多被引进的外来植物从室内外溢到自然环境中，从入侵过程的最初建立到全面入侵的出现有很长的滞后时间(Xie et al., 2001;

Banerjee et al., 2024)。因此，一个比较清晰的外来植物的区系特征及其影响因素研究是今后我国外来植物引种评估以及防控植物入侵的关键，对分析哪些区系成分的外来植物更有可能成为潜在的入侵植物具有重要意义。本文以中国外来植物数据集为基础，结合我国经济水平和气候条件等数据，探寻以下问题：（1）中国外来植物物种组成和区系成分特征如何；（2）各类型区系成分的空间分布特征如何；（3）主要影响因素有哪些。研究结果将有助于理解区域尺度外来入侵植物种类组成及演变趋势(吴征镒等，2010；殷根深等，2023)，对降低外来植物的入侵风险和防控管理工作有一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

中国外来植物名录来自于已发表的《中国外来植物数据集》，包括 283 科 3 233 属 14 710 个类群(林秦文等, 2022)。中国外来入侵植物名录来自马金双和李惠茹(2018)已发表的数据。各省市的 1999 年至 2022 年的社会经济指标均值，如国内生产总值（gross domestic product, GDP）、进口贸易总额（value of import trade, IMP）、入境游客数量（visitors）、城市绿地面积（urban green area, UGA）等数据来自国家统计局中国统计年鉴网站（http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/）。自然生态指标，如多年平均温度（annual mean temperature, T_a）、多年平均降水量（annual mean precipitation, P_a）、1 月均温（average temperature in January, T_1）与 7 月均温（average temperature in July, T_7）等数据来自中国气象数据网国家气象科学数据中心网站（http://data.cma.cn/）。

由于港澳台地区缺少城市绿地面积等部分数据，港澳两地面积较小并且缺乏准确权威的记载资料，相关外来植物调查研究数据较少，因此在相关回归分析时，剔除以上地区。

1.2 数据处理

根据吴征镒等(2003)和吴征镒等(2010)的世界种子植物科的分布区划分原则，对中国外来植物科的分布区类型进行统计，中国外来植物的 283 科可划分为 47 个分布区类型；根据《中国蕨类植物科属志》(吴兆洪和秦仁昌，1991)对蕨类植物科进行统计。由于中国外来植物的原产地是全球性的, 其中不少类群在国内缺乏准确权威的记载资料。对于未记载的外来植物科的情况，本文以世界在线植物志（The World Flora Online, WFO, https://www.worldfloraonline.org/）的信息为依据进行分布区统计。

植物科和属的数量组成分析中科的划分标准分别为单种科（含 1 种的科）、寡种科（含 2~5 种的科）、中型科（含 6~10 种的科）、较大科（含 11~20 种的科）、大型科（含≥21 种的科）(殷根深等，2023)。中国 283 个植物科中含有 53 个单种科，65 个寡种科，38 个中型科，28 个较大型科和 99 个大型科。属的划分标准分别为单种属（含 1 种的属）、寡种属（含 2~4 种的属）、中型属（含 5~8 种的属）、较大型属（含 9~12 种的属）、大型属（含>13 种的属）(侯新星等, 2019)。R/T 为热带成分科与温带植物科的比值，是衡量区系性质的指标之一(辛建攀等，2017)。利用逐步回归模型方法建立经济水平和自然指标的最优回归模型(Chen et al., 2022; Chen et al., 2023; 张吉平等，2023)，标准化回归系数用于量化每个因子对因变量的解释能力和方向。利用 Excel 2010 软件进行数据处理与分析，利用 ArcGIS 18.8.2 软件绘制分布格局图和 Origin Pro 绘制相关性热图。

2 结果分析

2.1 中国外来植物的物种组成

2.1.1 科的数量组成

如表 1 所示，尽管单种科、寡种科、中型科和较大型科 4 类的科数占总科数的 65.02%，但包含的物种数却只占总物种数的 5.59%，99 个大型科的物种数却贡献了总物种数的 93.41%。大型科的兰科（Orchidaceae）（263 属 1 174 种）、仙人掌科（Cactaceae）（142 属 1 173 种）、豆科（Fabaceae）（200 属 662 种）、菊科（Asteraceae）（214 属 597 种）、凤梨科（Bromeliaceae）（63 属 588 种）、棕榈科（Arecaceae）（153 属 500 种）、景天科（Crassulaceae）（29 属 494 种）、大戟科（Euphorbiaceae）（26 属 489 种）、阿福花科（Asphodelaceae）（25 属 480 种）、番杏科（Aizoaceae）（94 属 432 种）、夹竹桃科（Apocynaceae）（86 属 422 种）、桃金娘科（Myrtaceae）（42 属 410 种）、天门冬科（Asparagaceae）（58 属 404 种）、禾本科（Poaceae）（110 属 343 种）、蔷薇科（Rosaceae）（44 属 274 种）、唇形科（Lamiaceae）（56 属 241 种）和南天星科（Araceae）（47 属 238 种）等均超过 200

种，共包含了 1 652 属、8 921 种外来植物，分别占总属数的 51.10%和总物种数的 60.65%，其中兰科和仙人掌科的外来植物更是高达 1 174 种和 1 173 种。

表 1　中国外来植物科的数量组成及占比

Table 1　Quantitative composition and proportion of alien plants' families in China

科的等级 Family class	科 Family		种 Species	
	数量 Number	占比 Percentage (%)	数量 Number	占比 Percentage (%)
单种科(1 种)　Monotypic family (1 species)	53	18.73	53	0.36
寡种科(2~5 种)　Fewer family (2−5 species)	65	22.97	203	0.38
中型科(6~10 种)　Medium family (6−10 species)	38	13.43	303	2.06
较大型科(11~20 种)　Greater family (11−20 species)	28	9.89	410	2.79
大型科(≥21 种)　Large family(≥21 species)	99	34.98	13 741	93.41
合计 Total	283	100.00	14 710	100.00

2.1.2 属的数量组成

如表 2 所示，中国外来植物属中单种属共有 1 579 属，占总属数的 48.84%，贡献了总物种数的 10.73%。寡种属共有 998 属，占总属数的 30.87%，包含 2 606 种外来植物，占总物种数的 17.72%。中型属共有 321 属，占总属数的 9.93%，包含 1 965 种外来植物，贡献了总物种数的 13.36%。较大型属数量最少，只有 130 属，占总属数的 4.02%，只含有 1 361 种外来植物。大型属共计 205 属，占总属数的 6.34%，包含了 7 199 个物种，占总物种数的 48.94%，贡献率最高。大型属中的大戟属（*Euphorbia*）（436 种）、桉属（*Eucalyptus*）（262 种）、芦荟属（*Aloe*）（214 种）、乳突球属（*Mammillaria*）（142 种）、球兰属（*Hoya*）（141 种）、牡丹卷属（*Haworthia*）（140 种）、石斛属（*Dendrobium*）（133 种）、龙舌兰属（*Agave*）（126 种）、肉锥花属（*Conophytum*）（120 种）、铁兰属（*Tillandsia*）（119 种）、尖萼凤梨属（*Aechmea*）（119 种）、秋海棠属（*Begonia*）（117 种）、猪笼草属（*Nepenthes*）（100 种）、青锁龙属（*Crassula*）（99 种）、酢浆草属（*Oxalis*）（85 种）、拟石莲属（*Echeveria*）（75 种）、仙人球属（*Echinopsis*）（70 属）17 属共包含 2 498 种外来植物，占总物种数的 16.98%。

表 2　中国外来植物属的数量组成及占比

Table 2　Quantitative composition and proportion of alien plants' genus in China

属的等级 Genera class	属 Genus		种 Species	
	数量 Number	占比 Percentage (%)	数量 Number	占比 Percentage (%)
单种属(1 种)　Monotypic genera(1 species)	1 579	48.84	1 579	10.73
寡种属(2~4 种)　Fewer genera (2−4 species)	998	30.87	2 606	17.72
中型属(5~8 种)　Medium genera (5−8 species)	321	9.93	1 965	13.36
较大型属(9~12 种)　Greater genera (9−12 species)	130	4.02	1 361	9.25
大型属(≥13 种)　Large genera (≥13 species)	205	6.34	7 199	48.94
总计 Total	3 233	100.00	14 710	100.00

2.1.3 外来植物的功能类型组成

如图 1 所示，按照寿命周期分类，其中一年或一年至二年生外来植物（annual to biennial plant, ABP）有 61 科 366 属 819 种，分别占总科数、总属数和总种数的 21.55%、11.32%和 5.57%；一或二年至多年生植物（annual/biennial to perennial plant, APP）有 49 科 168 属 266 种，所占百分比分别为 17.31%、5.20%和 1.81%；多年生植物（perennial plant, PP）最多，共有 277 科 2 965 属 13 625 种，所占百分比分别为 97.87%、91.71%和 92.62%。按照不同生活型分类，中国外来草本植物（herb）有 147 科 1 745 属 8 800 种，所占百分比分别为 51.94%、53.97%和 59.82%，引进数量尤为突出，构成了外来植物的主体。乔木（tree）共有 109 科 693 属 2 130 种，所占百分比分别为 38.52%、21.44%和 14.48%；灌木（shrub）共计 142 科 776 属 2 875 种，所占百分比分别为 50.18%、24.00%和 19.54%。藤本植物（liana）共 73 科 255 属 633 种，占总种数的 4.30%，其中草质藤本 34 科 119 属 336 种，木质藤本 53 科 145 属 297 种。外来水生植物（aquatic plant, AP）有 51 科 115 属 272 种，占总种数的 1.85%。

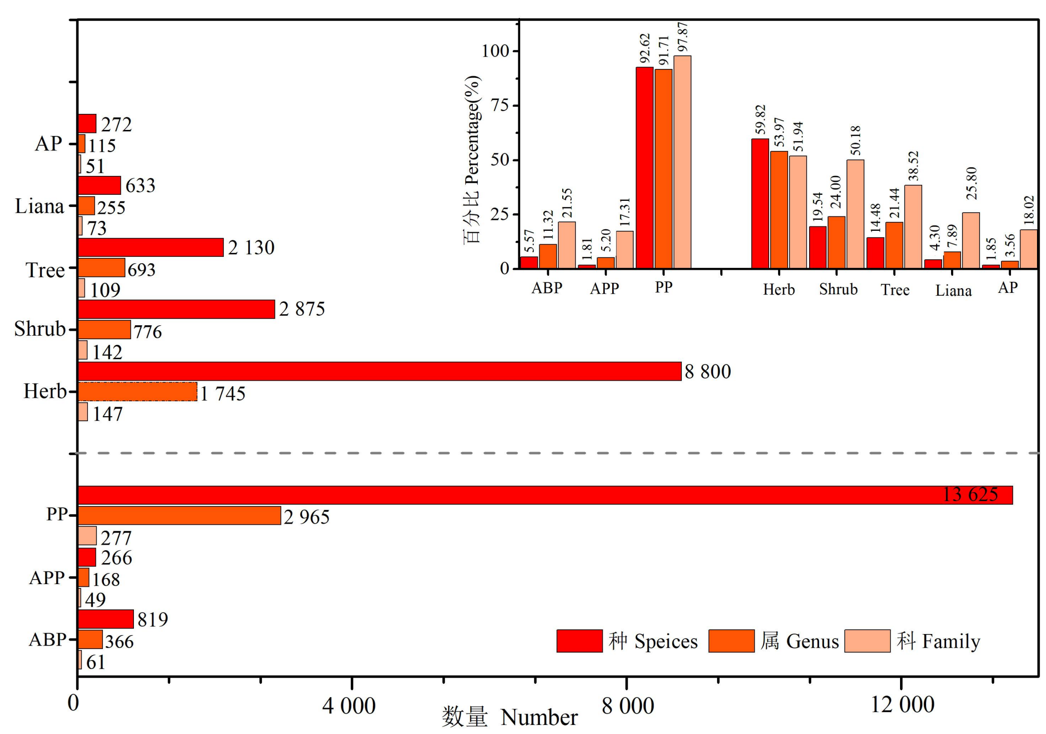


图 1　外来植物不同功能类型间数量统计

Fig. 1　Quantitative statistics of different functional types of alien plants

2.2 中国外来植物科的区系成分

如表 3 所示，全国范围内的外来植物中，属热带成分区系的植物科占据绝对优势，共 27 个类型，含 149 科，占总科数的 52.65%。其中泛热带分布型 62 科，占总科数的 21.91%，比例最高；类型 3 有 16 科，占比 5.65%；类型 2S 有 14 科，占总科数的 4.95%；其他热带成分类型含有 7~1 科不等。其次温带成分区系类型共有 17 个，包含 61 科，占比为 21.56%；类型 8-4 的植物科占比较高，有 19 科，占总科数的 6.71%；类型 9 和类型 8 分别有 11 科和 10 科，占比分别为 3.89%和 3.53%；其他温带成分区系各含有 8~1 科不等，占比低。第三为世界广布型，共有 58 科，占总科数的 20.49%。类型(16)和类型(17)共有 15 科，占总科数的 5.30%。R/T 为 2.44，表明我国外来植物科整体上属于热带性质。

表 3　中国外来植物科的区系特征

Table 3　Floristic characteristics of alien plant families in China

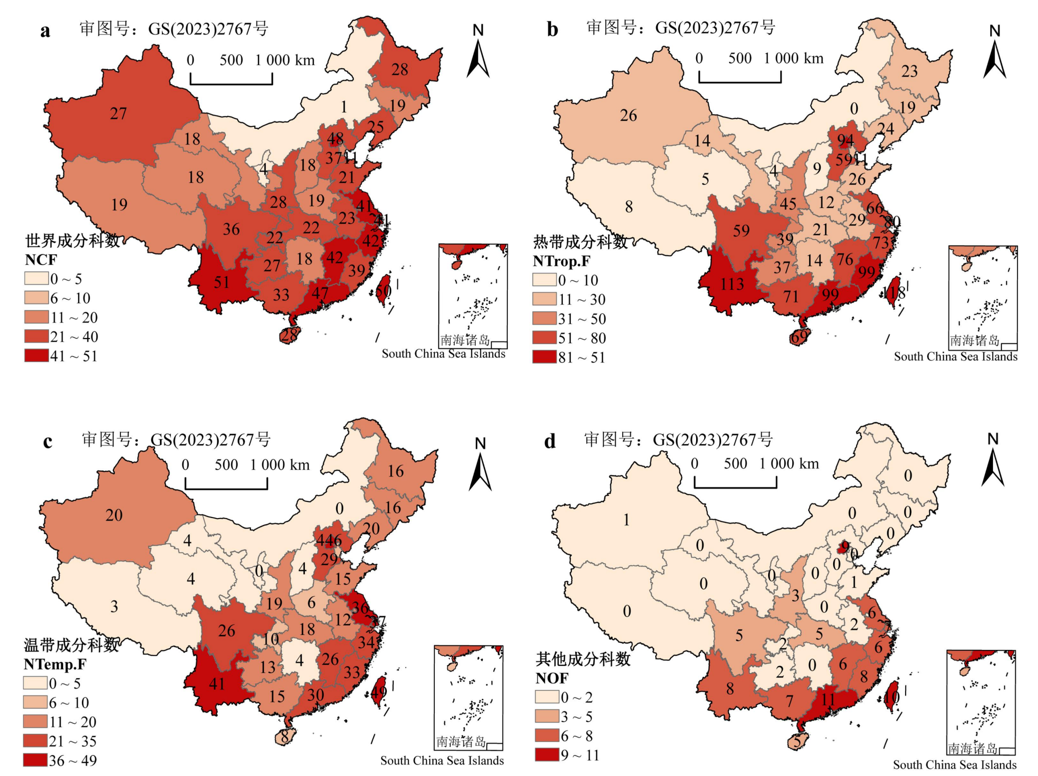
分布区类型 **Areal type**	科数 Number	占比 Percentage (%)
1. 世界广布 Cosmopolitan	**58**	**20.490**
2. 泛热带 Pantropic	62	21.908
2-1. 热带亚洲、大洋洲（至新西兰）和中至南美洲（或墨西哥）间断 Trop. Asia, Australia (to New Z.) & C. to S. Amer. (or Mexico)	3	1.060
2-2. 热带亚洲、非洲和中至南美洲间断 Trop. Asia, Africa & C. to S. Amer.	5	1.767
2S. 以南半球为主的泛热带 Pantropic especially S. Hemisphere	14	4.947
3. 东亚（热带、亚热带）及热带南美间断 E. Asia (Trop.& Subtr.) & Trop. Amer.	16	5.654
3b. 热带、亚热带中美至南美（含墨西哥中部及西印度群岛） Trop. & Subtr. C. to S. Amer., including C. Mexico & W. I.	4	1.413
3c. 亚马孙河盆地 Amazon Basin	1	0.353
3d. 热带南美、北至西印度群岛和美国南部 Trop. South Amer., North to West India & South USA	5	1.767
3e. 中、南智利低地至阿根廷 C. & S. Chile Lowland to adjacent Argentina	2	0.707
3f. 南美西部，特以安第斯山为主 W. S. Amer. especially Andes	1	0.353
3g. 巴西、乌拉圭、智利、阿根廷南部（温带） Brazil, Uruguay, Chile, S. Argentina (Temp.)	1	0.353
3i. 热带外的中、南美洲（沿安第斯山脉）Extratropical C. & S. Amer. (Trans-Andean)	1	0.353

4. 旧世界热带分布 Old World Trop.	6	2.120
4-1. 热带亚洲、非洲（东非，马达加斯加）和大洋洲间断 Trop. Asia, Africa (East Africa, Madag.) & Australia	1	0.353
5. 热带亚洲和热带大洋洲 Trop. Asia & Trop. Australia	7	2.473
5a. 澳大利亚东部和/或东北部 East and/or Northeast. Australia	2	0.707
5b. 澳大利亚西南部和/或西部 Southwest and/or West Australia	1	0.353
5c. 澳大利亚南部和塔斯马尼亚 South Australia & Tasmania	1	0.353
5/7. 马达加斯加特有 Endemic to Madagascar	1	0.353
6. 热带亚洲至热带非洲 Trop. Asia to Trop. Africa	4	1.413
6b. 热带非洲（撒哈拉以南至南非） Trop. Africa (S. Sahara to S. Africa)	1	0.353
6d. 南非（好望角） S. Africa (chiefly Cape)	4	1.413
6f. 西南非洲荒漠 Desert of SW. Africa	1	0.353
7. 热带亚洲（东南亚至印度-马来西亚，太平洋诸岛） Trop. Asia (SE. Asia to Indo-Malaya, Pacific Island)	1	0.353
7a. 西马来，新华莱斯线以西至中南半岛或印东北或热带喜马拉雅，南达苏门答腊 W. Malesia beyond New Wallace Line to Indo. Peninsula or N. India or Trop. Himalayas, South Sumatra	1	0.353
7d. 热带亚洲东达新几内亚 Trop. Asia E. to New Guinea	2	0.707
7e. 热带亚洲东南达西太平洋诸岛弧，包括新喀里多尼亚和斐济 Trop. Asia SE. to Western Pacific Islands, including New Caledonia and Fiji	1	0.353
热带成分小计 Subtotal of tropical	**149**	**52.650**
8. 北温带 North Temp.	10	3.534
8-2. 北极-高山 Arctic-alpine	1	0.353
8-4. 北温带和南温带间断 North Temp. & South Temp.	19	6.714
8-5. 欧亚和温带南美洲间断 Eurasia & Temp. South Amer.	3	1.060
8-6. 地中海、东亚、新西兰和墨西哥-智利间断 Mediterranean, E. Asia, New Zealand and Mexico-Chile	1	0.353
9. 东亚和北美间断 E. Asia & N. America	11	3.887
(9). 北美特有 Endemic to N. America	2	0.707
(9-2). 北美西、西南部至邻近的墨西哥或/和中美 West and Southwest N. America to adjacent Mexico or/and C. America	3	1.060
(9/3). 北美（东和/或西南），圭亚那高地间断 North America (E. and/or S.W.), Guyana Highland	1	0.353
10. 旧世界温带分布 Old World Temp.	1	0.353
12-1. 地中海至中亚和南部非洲、大洋洲间断 Mediterranean to C. Asia & S. Africa, Australia	1	0.353
12-2. 地中海至中亚和墨西哥至美国南部间断 Mediterranean To C. Asia & Mexico to S. USA	2	0.707
12-3. 地中海至温带-热带亚洲、大洋洲和南美洲间断 Mediterranean to Temp.-Trop. Asia, Australia & S. America	1	0.353
12-5. 地中海至北非、中亚、北美西南、南部非洲、智利和大洋洲间断 Mediterranean to N. Africa, C. Asia, Southwest N. America, S. Africa, Chile and Australia	1	0.353
14. 东亚分布（东喜马拉雅-日本）Endemic to Asia	2	0.707
14(SJ). 中国-日本 China-Japan	1	0.353
14(J). 日本特有 Endemic to Japan	1	0.353
温带成分小计 Subtotal of Temperate	**61**	**21.560**
(16). 澳大利亚、新西兰、新喀里多尼亚、北可达新几内亚至菲律宾和温带南美间断 Australia, New Zealand, New Caledonia North to New Guinea to Philippines and Temp. South America	8	2.827
(17). 热带非洲-南美洲间断或热带、亚热带非洲-马德雷区-南美洲间断 Trop. Africa-South America or Trop. & Subtr. Africa - Madre Region - South America	7	2.473
其他小计 Subtotal of Others	**15**	**5.300**
R/T	**2.44**	
总计	**283**	**100.00**

2.3 中国外来植物科区系成分的空间分布特征

中国外来植物总数（number of alien plants, NAP）和植物科区系成分的空间分布特征如

图 2 和图 3 所示。全国范围内，世界广布、热带成分、温带成分和其他成分的植物科呈现出相似的分布格局，即东部沿海和西南地区丰富，向内陆减少（图 2）。东部沿海的江苏、浙江、福建和台湾以及西南的云南和四川等省份的各区系成分科的数量最多，其中云南省的世界广布、热带成分和温带成分的科数分别为 51 科、113 科和 41 科；台湾省各区系成分的科数分别为 50 科、118 科和 49 科，是全国范围内外来植物区系最丰富的地区（图 2：a–c）。而内蒙古、宁夏和青海等省（区）的各区系丰富度最少。值得注意的是，河北省和北京市的外来植物区系成分也较为丰富，尤其是北京市，世界成分、热带成分、温带成分和其他成分的科数分别为 48 科、94 科、44 科和 9 科（图 2）。



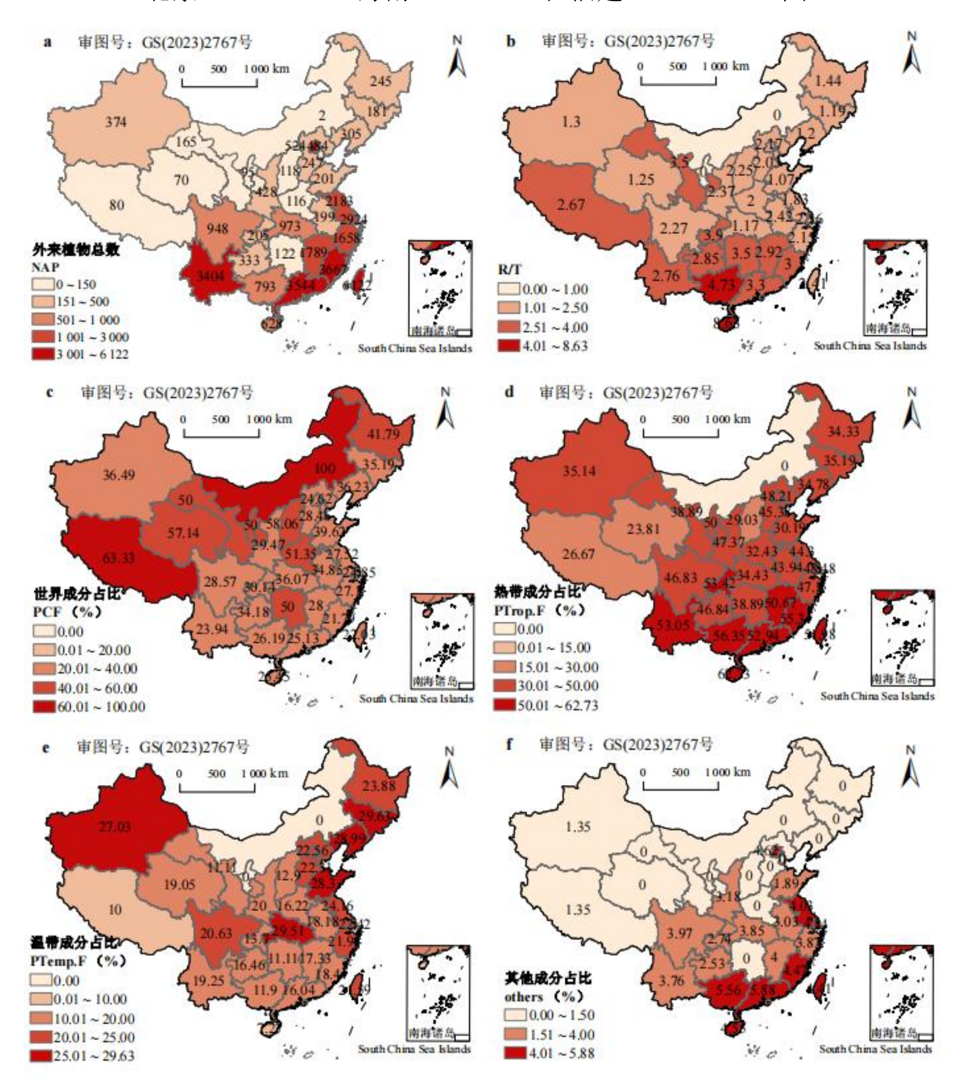
NCF. 世界成分科数；**NTrop.F**. 热带成分科数；**NTemp.F**. 温带成分科数；**NOF**. 其他成分科数。下同。
NCF. Number of cosmopolitan family; **NTrop.F**. Number of tropical family; **NTemp.F**. Number of temperate family; **NOF**. Number of other family. The same below.

图 2　中国外来植物科的区系分布格局

Fig. 2　Floristic distribution patterns of alien plant families in China

中国外来植物的分布格局支持了植物科区系成分的分布格局（图 3：a），即东部沿海和西南地区最丰富，向内陆地区减少。中国外来植物最丰富的地区分别为台湾（6 211 种）、北京（5 244 种）、福建（3 667 种）、广东（3 544 种）和云南（3 404 种）；外来植物属最少的地区是内蒙古（2 种）、青海（70 种）、西藏（84 种）和宁夏（95 种）等地区。由图 3：b 可见，R/T 值最大的两个地区是海南和广西，分别为 8.63 和 4.73，重庆（3.9）、甘肃（3.5）、湖南（3.5）、广东（3.3）和福建（3.0）的 R/T 值大于 3；R/T 值较小的地区分别是山东（1.07）、湖北（1.17）、青海（1.25）、新疆（1.3）和东北三省。就外来植物科的区系成分占比而言，中国北方和中西部地区的世界成分占比最高，例如内蒙古（100%）、西藏（63.33%）、山西（58.06%）、青海（57.14%）和河南（51.35%）等；而福建（21.79%）、台湾（22.03%）、云南（23.94%）、北京（24.62%）和上海（24.85%）等地的占比较低（图 3：c）。中国东南沿海和西南地区的热带成分占比最高，例如海南（62.73%）、广西（56.35%）、福建（55.31%）、广东（52.94%）和台湾（51.98%）以及重庆（53.42%）和云南（53.05%）；而内蒙古（0%）、青海（23.81%）、西藏（26.67%）和山西（29.03%）的占比最低（图 3：d）。吉林、湖北、辽宁、山东和新疆等地的温带成分占比最高，分别为 29.63%、29.51%、

28.99%、28.3%和 27.03%（图 3：e）。其他类型占比最高的地区分别为广东（5.88%）、广西（5.56%）、北京（4.62%）、海南（4.55%）和福建（4.47%）（图 3：f）。



NAP. 外来植物总数；**PCF**. 世界成分占比；**PTrop.F**. 热带成分占比；**PTemp.F**. 温带成分占比；**others**. 其他成分占比。下同。

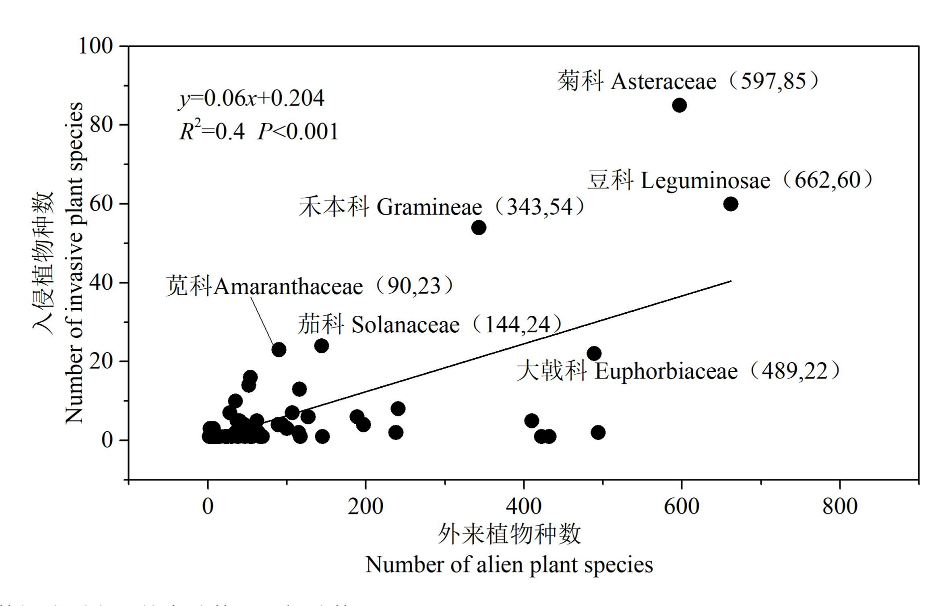
NAP. Number of alien plant; **PCF**. Proportion of cosmopolitan family; **PTrop.F**. Proportion of tropical family; **PTemp.F**. Proportion of temperate family; **others**. Proportion of others. The same below.

图 3　中国外来植物科的各区系成分占比分布格局

Fig. 3　Distribution pattern of floristic components of alien plant families in China

2.4 中国外来植物与外来入侵植物相关性分析

如图 4 所示，我国外来植物所在科的外来种数与其包含的入侵种数之间存在显著正相关关系(R^2=0.4，P<0.001)，即该科所包含的外来物种多样性越高，入侵物种数就越多。外来植物科中物种多样性大科，如菊科、豆科、禾本科、大戟科等超级大科，包含了最多的入侵植物种数，分别为 85 种、60 种、54 种和 22 种(马金双和李惠茹, 2018)。



扩号里数据分别表示外来种数和入侵种数。

The data in the brackets indicate the number of alien species and the number of invasive species, respectively.

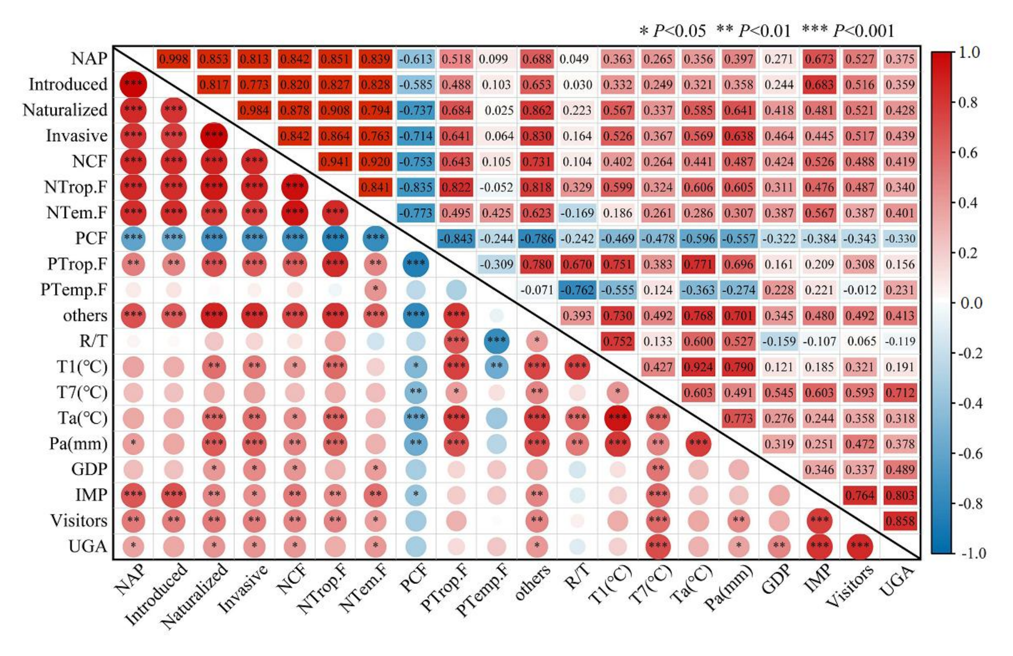
图 4　我国外来植物所在科的外来种数与该科包含的入侵种数的关系

Fig. 4　The relationship between the numbers of alien plants and invasive alien plants in China

2.5 中国外来植物总数和区系特征的影响因素分析

如图 5 所示，各省市的外来植物总数和引进植物、归化植物、入侵植物的数量以及区系成分科数等均与进口贸易和入境游客数等经济指标之间存在显著正相关，其中年均进口贸易总额对外来植物总数和引进植物数量的解释率最高，相关性系数分别为 0.673 (P＜0.001)和 0.683 (P＜0.001)，说明各省市的经济水平越高，对外贸易越频繁，入境游客越多，因经济贸易主动引进的和游客等无意带入的外来物种数量也就越多，植物区系成分也就越复杂。城市绿地面积与外来植物总数、归化植物和入侵植物数存在显著正相关关系，说明城市绿地为外来植物的定植、外逸、入侵提供了场所。自然因素中，各省市 1 月均温、年均温及年均降水量均与归化植物、入侵植物数、世界成分科和热带植物科具有显著正相关性，说明各省市的水热条件越好，尤其是冬季温度条件越好，其世界成分、热带成分和其他区系成分的外来植物越多，其中热带区系植物的占比越大，其他区系成分也越丰富。但世界成分科的占比与外来植物总数及各省市水热条件间呈显著负相关关系。

如表 4 所示，逐步回归分析提取了进口贸易额、城市绿地面积和年均降水量等 3 个显著影响因素建立最优模型，对外来植物总数和引进外来植物数量的解释率较高，R^2 分别为 0.656 和 0.666。年均降水量和进口贸易额是归化植物和入侵植物的主要影响因素，最优模型 R^2 分别为 0.550 和 0.525。进口贸易额也是世界成分科(0.397，P＜0.05)、热带成分科(0.571，P＜0.001)和温带成分科(0.577，P＜0.001)数量的重要影响因素。而自然因素中，年均降水量(0.435，P＜0.01)影响世界成分植物数量，而多年均温(0.777，P＜0.001)和 7 月均温(-0.474，P＜0.05)是热带成分科的影响因素。多年平均温度是世界成分和热带成分占比的重要影响因素，标准化系数分别为-0.592 (P＜0.001)和 0.708 (P＜0.001)。



Introduced. 引进外来植物数；**Naturalized**. 归化植物数；**Invasive**. 入侵植物数；**IMP**. 进口贸易额；**Visitors**. 入境游客数量；**GDP**. 国民生产总值；**UGA**. 城市绿地面积；**T_7**. 7 月平均温度；**T_1**. 1 月平均温度；**T_a**. 多年平均温度；**P_a**. 多年平均降水量。

Introduced. Number of introduced plants; **Naturalized**. Number of naturalized plants; **Invasive**. Number of invasive plants; **IMP**. Value of import trade; **Visitors**. Number of oversea visitor arrivals; **GDP**. Gross domestic product; **UGA**. Urban green area; **T_7**. Average temperature in July; **T_1**. Average temperature in January; **T_a**. Average annual temperature; **P_a**. Average annual precipitation.

图 5　外来植物数量、区系成分与关键社会经济和生态指标的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis of the total number of alien plants with key socio-economic and ecological indicators

表 4 中国外来植物区系成分与影响因素的逐步回归分析结果

Table 4　Results of regression analysis of Chinese alien plant floras and influence factors

外来植物区系 Alien plant floras	影响因素 Influence factor	标准化系数 Standardized coefficient	R^2
外来植物总数 NAP	进口贸易额 IMP ***	1.099	0.656
	城市绿地面积 UGA **	-0.649	
	多年平均降水量 P_a ***	0.378	
引进外来植物数 Introduced	进口贸易额 IMP ***	1.162	0.666
	城市绿地面积 UGA **	-0.703	
	多年平均降水量 P_a *	0.339	
归化植物数 Naturalized	多年平均降水量 P_a ***	0.572	0.550
	进口贸易额 IMP *	0.337	
入侵植物数 Invasive	多年平均降水量 P_a ***	0.580	0.525
	进口贸易额 IMP *	0.301	
世界成分科数 NCF	多年平均降水量 P_a **	0.435	0.444
	进口贸易总额 IMP *	0.397	
热带成分科数 NTrop.F	多年平均温度 T_a ***	0.777	0.613
	进口贸易总额 IMP **	0.571	
	7 月平均温度 T_7 *	-0.474	
温带成分科数 NTemp.F	进口贸易总额 IMP ***	0.577	0.333
世界成分占比 PCF	多年平均温度 T_a ***	-0.592	0.350
热带成分科占比 PTrop.F	多年平均温度 T_a ***	0.708	0.484
温带成分科占比 PTemp.F	—	—	—

注：表中缩写具体见图 2、图 3 和图 5。*表示 $P<0.05$；**表示 $P<0.01$；***表示 $P<0.001$.

Note: The abbreviations in the table are shown in Figures 2, 3, and 5. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$.

3 讨论与结论

3.1 中国外来植物的物种组成特征

我国引进的外来植物种类丰富，大型科在科、种水平上均占显著优势，分别贡献了总科数的 34.98%和总物种数的 93.41%。其中，兰科和仙人掌科的种数均超过 1 000 种，这可能与我国大量室内栽培观赏植物（园艺、花卉等）的引进有关。寡种科的占比（22.97%）也较高，但其包含的物种数只贡献了总物种的 0.38%。单种属和寡种属在属水平上占优势，两者占总属数的 79.67%，而大型属则在总物种上居明显优势，贡献了总物种数的 48.94%，说明我国外来植物内部各科属之间的优势差别较明显。

草本植物构成了中国外来植物的主体，其中以一二年生草本植物占优势，与已有的研究结果一致(Li & Shen, 2020)。生活型是植物在长期进化过程中对环境不断适应的结果，是区域自然地理条件的综合反映(李星学等，1981；张大勇, 2003)。草本植物较木本植物，适应环境的能力更强(李星学等, 1981)。一年生或一二年生的短命植物的 r-生活史策略具有明显优势，多具有较强繁殖能力和种子扩散能力(张斯斯和肖宜安，2013；侯新星等，2019)，如喜旱莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）、加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis*）、一年蓬（*Erigeron annuus*）等入侵植物都属此类。本研究结果表明，外来植物大科所包含的外来物种多样性越高，入侵物种数就越多。如菊科、豆科、禾本科、大戟科等超级大科，包含了最多的入侵植物种数。在已有研究中，省域范围的菊科、豆科与禾本科都构成了入侵植物的主体(侯新星等，2019；宋兴江等，2021；万自学等，2022；殷根深等，2023)，以上植物科多为草本植物，与本研究结果一致。我国的外来植物中有 59.82%的草本植物，作为牧草、观赏植物、纤维植物、蔬菜、草坪植物等被大量人为有意引入，进一步提高了外来植物入侵的潜在风险，已成为我国的重要环境问题。

3.2 我国外来植物科的区系特征

从植物科的区系成分看，中国外来植物区系共有 13 个类型和 34 个变型，分布区类型较为复杂。热带成分科占据明显优势，共有 149 科，占总科数的 52.61%；其中泛热带分布型（62 科，21.91%）的占比最高。其次温带成分的植物科共有 62 科，占比 21.91%。再次是世界广布类型（58 科，20.49%）。这一结果与我国入侵植物的热带区系成分结果相似(马金双和李惠茹，2018)，中国 70 科入侵植物，可分为 9 个分布区类型，热带成分科共 35 科，占比最大（50%），其中泛热带分布植物科共 20 科，占比 28.57%。但世界广布的入侵植物科共 29 科，占比 41.43%，结果高于该类型外来植物的占比。而成功入侵我国的温带成分科的占比最少，为 8.57%，与外来植物的温带成分占比差异较大。大型科中菊科、豆科、禾本科、苋科及茄科等均为世界分布科，具有广泛的适应性。入侵植物具有较强的入侵能力，比如较大的叶面积、高光合速率、氮素利用率、水分利用效率、生长速率等，以及种子质量小、适应能力强、化感作用等性状优势(van Kleunen et al., 2010; Mathakutha et al., 2019; Zhang et al., 2021)。菊科植物多以草本植物为主，种子如瘦果小且量大，具冠毛、尖刺结构等，对其扩散过程有显著增强作用(全威等，2018)。部分菊科植物具有较高的胁迫耐受性和表型可塑性(Davidson et al., 2011; Wang et al., 2022)，例如飞机草（*Chromolaena odorata*）抗旱性较强(Li et al., 2022)，大狼杷草（*Bidens frondosa*）、鬼针草（*Bidens pilosa*）、银胶菊（*Parthenium hysterophorus*）等对光照、水分和养分等具有较高表型可塑性(蒲高忠等，2010; Wei et al., 2017; 潘玉梅等，2017)。豆科植物根系庞大并具固氮能力(陆保福等，2023)，适应力强。禾本科植物通过增强比叶面积和光强利用率来提高其群体的入侵性(Xu et al., 2022a,b)。泛热带植物科中，如大戟科、锦葵科、爵床科、凤仙花科和天南星科等均含有大量的外来植物和数量不等的入侵植物，其中大戟科外来入侵植物（22 种）最多。大戟科主产于热带和亚热带地区，具有较大经济价值和观赏价值，我国引入栽培物种数量大、历史久，例如猩猩草（*Euphorbia cyathophora*）、飞扬草（*E. hirta*）、通奶草（*E. hypericifolia*）、蓖麻（*Ricinus communis*）等，均属于典型草本入侵植物(马金双和李惠茹，2018)。

就外来植物区系成分占比而言，各区系的占比在空间分布上存在明显差异。北方和中西部省市的世界广布科的比例较高，东部和西南地区的热带成分科的比例较高，而北方沿海省市的温带成分科的占比最高。已有研究结果表明，热量水平是影响外来热带成分植物入侵成功的重要因素(Chen et al., 2021, 2023; Qin et al., 2023; Yang et al., 2023)，热带及亚热带气候占比大的省份，其入侵植物热带成分科的比例都很大，如江苏、重庆、云南等地的比例分别为

84.62%、47.36%和 50.85%；而山东、河南、黑龙江等温带植物属的占比较高，分别为 36.60%、34.13%和 68.00%(殷根深等, 2023)。

3.3 中国外来植物总数、区系特征和空间格局的影响因素

本研究结果表明总体上中国外来植物总数、总科数、各区系成分科数在我国呈现相似的分布格局，即东部沿海和西南地区丰富，向内陆减少，与我国外来入侵生物的分布格局相似(Chen et al., 2022, 2023; Yang et al., 2023)，即经济较发达和水热条件较好的地区，外来植物的丰富度最高。气候（年均温和降水量）和社会经济指标结合能更好地解释以上分布格局(张吉平等，2023; Chen et al., 2023; Yang et al., 2023)。大空间尺度的研究表明，外来物种的丰富程度与社会经济因素与人类活动，如国内生产总值、人口密度、国际贸易等密切相关(Fonseca et al., 2019; 吉平等, 2023; Yang et al., 2023)。中国东部沿海、南部和西南部的省份 GDP 高，城市化水平、人口规模和密度都远高于西北和北部内陆地区(Luo et al., 2018)。例如广东省，自 19 世纪以来一直是国际贸易的关键地区(Croddy, 2022)，也是我国外来植物最为丰富的地区。本研究中外来植物总数，尤其是引进植物的数量与进口贸易额、入境游客数等社会经济指标均存在极显著正相关，支持以上结论。并且有研究指出近 80 年来，中国沿海和南方地区的外来植物一直在稳步积累，还没有达到饱和状态(Banerjee et al., 2024)。经济发达的地区，国际贸易量大、干扰大，有助于外来植物传播到新的地区，然而新地区的气候条件是该物种在该区能否适应、生存、繁殖、扩散并造成入侵危害的关键(Chen et al., 2021; Chen et al., 2022)。我国东部沿海、南部和西南部地区属热带或亚热带气候类型，与热带美洲的气候特征相似，而我国的外来植物的主要原产地为美洲和非洲的热带地区(林秦文等，2022)，原产地与引入地的气候相似性促进外来植物的繁殖、扩散、归化甚至入侵，因此我国东部沿海、南方和西南地区成为外来植物入侵的热点地区。

值得注意的是，本研究中在一些北方寒冷的经济发达的地区，例如北京（5 244 种）也是外来植物比较丰富的地区，这些地区引入的多种类型的外来植物可以借助各种温室设施进行栽培，因此其外来植物数量实际上与当地的经济、社会和园艺发展水平更加密切相关(林秦文等，2022)。有研究表明，近 50 年来我国北方和一些内陆大城市关于外来入侵植物的报道越来越多，逐渐成为外来植物入侵的热点地区(Qin et al., 2023; Banerjee et al., 2024)，这一趋势可能与这些地区生态系统对气候变化的高敏感性(Hu et al., 2023)和土地利用的快速变化有关(Zhu et al., 2022)。

综上所述，我国的外来植物种类丰富，其中草本植物的引进数量尤为突出，构成了外来植物的主体。区系类型中热带成分科占据明显优势，共含有 149 科，占总科数的 52.65%，其中泛热带分布型（21.91%）的占比最高。社会经济水平较高，气候条件较好的中国东部沿海、南方地区和西南地区的外来植物最丰富，热量水平越高的省市，外来植物中热带成分的占比越大。因此，对于全国东部沿海及西南省份等外来植物最丰富的地区，应当持续加强对外来植物的管理与防控工作；大力加强对具有热带性质和世界广布的大科、大属的草本植物的引种评估与外逸监测，控制引进数量。对北方经济发达地区进一步加强外来植物的入侵风险等级评估和潜在入侵范围的研究，制定潜在入侵植物名单；控制世界广布和温带成分的植物引进量，以降低外来植物外逸而成功入侵的概率。

参考文献:

BANERJEE AK, FENG H, BHOWMICK AR, et al., 2024. Alien flora are accumulating steadily in China over the last 80 years [J]. iScience, 27(4): 109952.

CHEN J, MA FZ, ZHANG YJ, et al., 2021. Spatial distribution patterns of invasive alien species in China [J]. Global Ecology and Conservation, 26: e01432.

CHEN J, ZHANG YJ, LIU W, et al., 2023. Distribution patterns and determinants of invasive alien plants in China [J]. Plants, 12: 2341.

CHEN XL, NING DD, XIAO Q, et al., 2022. Factors affecting the geographical distribution of invasive species in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 21(4): 1116-1125.

CRODDY E, 2022. Guangdong Province [M]// CRODDY E. China's provinces and populations: a chronological and geographical survey. Berlin: Springer International Publishing: 165-198.

DAVIDSON AM, JENNIONS M, NICOTRA AB, 2011. Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis [J]. Ecology Letters, 14(4): 419-431.

DIAGNE C, LEROY B, VAISSIERE A, et al., 2021. High and rising economic costs of biological invasions worldwide [J]. Nature, 608(7924): 571-576.
FINCH DM, BUTLER JL, RUNYON JB, et al. 2021. Effects of climate change on invasive species [M]// POLAND TM, PATEL-WEYNAND T, FINCH DM, et al. Invasive Species in Forests and Rangelands of the United States: A Comprehensive Science Synthesis for the United States Forest Sector. Berlin: Springer International Publishing: 57-83.
FONSECA R, BOTH C, CECHIN SZ, 2019. Introduction pathways and socio-economic variables drive the distribution of alien amphibians and reptiles in a megadiverse country [J]. Diversity and Distributions, 25(7): 1130-1141.
HOU XX, XIN JP, LU MT, et al., 2019. Analysis of flora, life form and reproductive characteristics of alien species in Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 38(9): 1982-1990. [侯新星，辛建攀，陆梦婷，等，2019. 江苏外来入侵植物区系、生活型及繁殖特性 [J]. 生态学杂志，38(9)：1982-1990.]
HU Y, WEI F, FU B, et al., 2023. Ecosystems in China have become more sensitive to changes in water demand since 2001 [J]. Communications Earth & Environment, 4: 444.
KRIPAL S, CHAEHO B, 2023. Ecological restoration after management of invasive alien plants [J]. Ecological Engineering, 197: 107122.
LI WT, ZHENG YL, WANG RF. 2022. Extension of the EICA hypothesis for invasive *Chromolaena odorata* [J]. Acta Oecologica, 114: 103803.
LI XX, ZHOU ZY, GUO SX, 1981. The development and evolution of the plants [M]. Beijing: Science Press: 40-50. [李星学，周志炎，郭双兴，1981. 植物界的发展和演化 [M]. 北京：科学出版社：40-50.]
LI YY, SHEN ZH. 2020. Roles of dispersal limit and environmental filtering in shaping the spatiotemporal patterns of invasive alien plant diversity in China [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 8: 544670.
LIU Y, XU X, DIMITROV DP, et al., 2023. An updated floristic map of the world [J]. Nature Communications, 14: 2990.
LIN QW, XIAO C, MA JS, 2022. A dataset on catalogue of alien plants in China [J]. Biodiversity Science, 30(5): 22127. [林秦文，肖翠，马金双，2022. 中国外来植物数据集 [J]. 生物多样性，30(5)：22127.]
LIU YJ, HUANG W, YANG Q, et al., 2022. Research advances of plant invasion ecology over the past 10 years [J]. Biodiversity Science, 30(10): 22438. [刘艳杰，黄伟，杨强，等，2022. 近十年植物入侵生态学重要研究进展 [J]. 生物多样性，30(10)：22438.]
LUO T, XU M, HUANG TT, et al., 2018. Rethinking the intensified disparity in urbanization trajectory of a Chinese coastal province and its implications [J]. Journal of Cleaner Production, 195: 1523-1532.
LU LM, MAO LF, YANG T, et al., 2018. Evolutionary history of the angiosperm flora of China [J]. Nature, 554: 234-238.
LU BF, KANG WJ, SHI SL, et al., 2023. Nitrogen fixation system of Legume-Rhizobia and its Carbon-Nitrogen interaction [J]. Chinese Journal of Grassland, 45(11): 119-135. [陆保福，康文娟，师尚礼，等，2023. 豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作 [J]. 中国草地学报，45(11)：119-135.]
MA JS, LI HR, 2018. The checklist of the alien invasive plants in China [M]. Beijing: Higher Education Press: 2-176. [马金双，李惠茹，2018. 中国外来入侵植物名录 [M]. 北京：高等教育出版社：2-176.]
MATHAKUTHA R, STEYN C, ROUX PCL, et al., 2019. Invasive species differ in key functional traits from native and non-invasive alien plant species [J]. Journal of Vegetation Science, 30(5): 994-1006.
PAN YM, TANG SC, WEI CQ, et al., 2017. Comparison of growth, photosynthesis and phenotypic plasticity between invasive and native Bidens species under different light and water conditions [J]. Biodiversity Science, 25(12): 1257-1266. [潘玉梅，唐赛春，韦春强，等，2017. 不同光照和水分条件下鬼针草属入侵种与本地种生长，光合特征及表型可塑性的比较 [J]. 生物多样性，25(12)：1257-1266.]
PU TZ, TANG SC, PAN YM, et al., 2010. Phenotypic plasticity and modular biomass of invasive *Parthenium hysterophorus* in different habitats in south China [J]. Guihaia, 30(5): 641-646.

[蒲高忠，唐赛春，潘玉梅，等，2010. 入侵植物银胶菊在不同生境下表型可塑性和构件生物量 [J]. 广西植物，30(5)：641-646.]
PYŠEK P, PERGL J, ESSL F, et al., 2017. Naturalized alien flora of the world: species diversity, taxonomic and phylogenetic patterns, geographic distribution and global hotspots of plant invasion [J]. Preslia, 89(3): 203-274.
PYŠEK P, HULME PE, SIMBERLOFF D, et al., 2020. Scientists' warning on invasive alien species [J]. Biological Reviews, 95: 1511-1534.
QIN F, HAN BC, BUSSMANN RW, et al., 2023. Present status, future trends, and control strategies of invasive alien plants in China affected by human activities and climate change [J]. e06919.
QUAN W, WANG M, SANG WG, 2018. Selection of simulation models for seed dispersal of invasive plants by wind [J]. Chinese Journal of Ecology, 37(9): 2840-2848. [全威，王明，桑卫国，2018. 外来入侵植物风传扩散过程模拟模型选择 [J]. 生态学杂志，37(9)：2840-2848.]
RICHARDSON DM, PYSEK P, REJMANEK M, et al., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions [J]. Diversity and Distributions, 6(2): 93-107.
SONG XJ, ZHANG WG, CHEN XY, et al., 2021. The composition and distribution status of alien plant species in Shaanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 40(12): 3800-3809.[宋兴江，张文刚，陈晓艳，等，2021. 陕西省外来植物组成与分布现状 [J]. 生态学杂志，40(12)：3800-3809.]
VAN KLEUNEN M, WEBER E, FISCHER M, 2010. A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant species [J]. Ecology Letters, 13(2): 235-245.
WANG S, CHEN JX, LIU MC, et al., 2022. Phenotypic plasticity and exotic plant invasions: Effects of soil nutrients, species nutrient requirements, and types of traits [J]. Physiologia Plantarum, 176(1): 13637.
WAN ZX, LIU C, ZHANG ZY, et al., 2022. Current situation and control of alien plant invasion in the Hunan region of the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Biosafety, 31(3): 235-244. [万自学，刘川，张正云，等，2022. 长江经济带湖南区域外来植物入侵现状及防控对策 [J]. 生物安全学报，31(3)：235-244.]
WANG CT, LIU J, XIAO HG, et al., 2016. Floristic characteristics of alien invasive seed plant species in China [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88(3 Suppl.): 1791-1797.
WEI C, TANG S, PAN Y, et al., 2017. Plastic responses of invasive *Bidens frondosa* to water and nitrogen addition [J]. Nordic Journal of Botany, 35(2): 232-239.
WU ZH, QIN RC, 1991. Pteridophytes of China [M]. Beijing: Science Press: 147, 410. [吴兆洪，秦仁昌，1991. 中国蕨类植物科属志 [M]. 北京：科学出版社：147，410.]
WU ZY, SUN H, ZHOU ZK, et al., 2010. Floristics of Seed Plants from China [M]. Beijing: Science Press: 52-55. [吴征镒，孙航，周浙昆，等，2010. 中国种子植物区系地理 [M]. 北京：科学出版社：52-55.]
WU ZY, ZHOU ZK, LI DZ, et al., 2003. The Areal-types of the World Families of Seed Plants [J]. Acta Botanica Yunnanica, 25(3): 245-257. [吴征镒，周浙昆，李德铢，等，2003. 世界种子植物科的分布区类型系统 [J]. 云南植物研究，25(3)：245-257.]
XIE Y, LI ZY, GREGG WP, et al., 2001. Invasive species in China - an overview [J]. Biodiversity and Conservation, 10(8): 1317-1341.
XIE Y, XU YF, YOU JR, et al., 2020. Species composition, flora and invasion hazard of alien plants in Huangjinhe National Wetland Park [J]. Chinese Journal of Ecology, 39(11): 3613-3622. [谢勇，徐永福，游健荣，等，2020. 黄金河国家湿地公园外来植物种类组成，区系与入侵危害 [J]. 生态学杂志，39(11)：3613-3622.]
XIN JP, SUN XX, TIAN RN. 2017. Floristic diversity and fundamental characteristics of seed plants on Mount Jiangjun, Nanjing [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 34(4): 629-636. [辛建攀，孙欣欣，田如男，2017. 南京将军山种子植物区系多样性及基本特征 [J]. 浙江农林大学学报，34(4)：629-636.]
XU X, ZHANG Y, LI S, et al., 2022a. Native herbivores indirectly facilitate the growth of invasive Spartina in a eutrophic saltmarsh [J]. Ecology, 103: 3610.
XU X, ZHOU C, HE Q, et al., 2022b. Phenotypic plasticity of light use favors a plant invader in nitrogen-enriched ecosystems [J]. Ecology, 103: 3665.

YANG YB, BIAN ZH, REN WJ, et al., 2023. Spatial patterns and hotspots of plant invasion in China [J]. Global Ecology and Conservation, 43: e2424.
YIN GS, ZHANG SS, CHEN WL, et al., 2023. Analysis on the floristics and diversity of invasive alien plants in Yunnan Province [J]. Journal of Biosafety, 32(1): 16-24. [殷根深，张双双，程文磊，等，2023. 云南省外来入侵植物的区系成分及多样性分析[J]. 生物安全学报，32(1)：16-24.]
ZHANG D. 2003. Plant life history evolution and reproductive ecology [M]. Beijing: Science Press: 3-7. [张大勇，2003. 植物生活史进化与繁殖生态学 [M]. 北京：科学出版社：3-7.]
ZHANG JP, MIAO L, WU PL, et al., 2023. Effects of anthropogenic activities and climate factors on the distribution of invasive alien species in China [J]. Scientia Sinica Vitae, 53(4): 543-550. [张吉平，苗露，伍盘龙，等，2023. 人类活动和气候因子对中国外来入侵物种分布的影响 [J]. 中国科学：生命科学，53(4)：543-550.]
ZHANG SS, XIAO YA. 2013. Life-form and diversity of sexual system of invasive alien plants in China [J]. Bulletin of Botanical Research, 33(3): 351-359. [张斯斯，肖宜安，2013. 中国外来入侵植物生活型与性系统多样性 [J]. 植物研究，33(3)：351-359.]
ZHANG Z, LIU Y, YUAN L, et al., 2021. Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis [J]. Ecology Letters, 24(2): 348-362.
ZHAO GH, GAO ML, WANG D, et al., 2024. Economic cost assessment of global invasive plants [J]. Acta Prataculturae Sinica, 33(5): 16-24. [赵光华，高明龙，王朵，等，2024. 全球入侵植物的经济成本评估 [J].草业学报，33(5)：6-24.]
ZHOU QL, WANG L, JIANG Z, et al., 2020. Effects of climatic and socialactors on dispersal strategies of alien species across China [J]. Science of the Total Environment, 749: 141443.
ZHU Z, ZHANG Z, ZHAO X, et al., 2022. Characteristics of land use change in China before and after 2000 [J]. Sustainability, 14: 14623.